



**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA**  
**SEDE CUENCA**  
**CARRERA DE ELECTRICIDAD**

**EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA ENERGÉTICA EN TRANSFORMADORES DE  
DISTRIBUCIÓN BAJO DIFERENTES CONDICIONES DE CARGA**

Trabajo de titulación previo a la obtención del  
título de Ingeniero Eléctrico.

AUTOR: FABRICIO LEONEL ENRIQUEZ MOROCHO  
TUTOR: ING. PABLO DANIEL ROBLES LOVATO, MSc.

Cuenca - Ecuador  
2026

## **CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN**

Yo, Fabricio Leonel Enriquez Morocho con documento de identificación N° 0106180383, manifiesto que:

Soy el autor y responsable del presente trabajo; y, autorizo a que sin fines de lucro la Universidad Politécnica Salesiana pueda usar, difundir, reproducir o publicar de manera total o parcial el presente trabajo de titulación.

Cuenca, 10 de marzo del 2026

Atentamente,

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Fabricio Leonel Enriquez Morocho' with a large number '3' written at the end of the signature.

---

Fabricio Leonel Enriquez Morocho

0106180383

**CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE  
TITULACIÓN A LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA**

Yo, Fabricio Leonel Enriquez Morocho con documento de identificación N° 0106180383, expreso mi voluntad y por medio del presente documento cedo a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que soy autor del Artículo Académico “Evaluación de la eficiencia energética en transformadores de distribución bajo diferentes condiciones de carga”, el cual ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniero Eléctrico, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En concordancia con lo manifestado, suscribo este documento en el momento que hago la entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Cuenca, 10 de marzo del 2026

Atentamente,

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Fabricio Leonel Enriquez Morocho' with a large number '3' written at the end of the signature.

---

Fabricio Leonel Enriquez Morocho

0106180383

## CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Pablo Daniel Robles Lovato con documento de identificación N° 0101663342, docente de la Universidad Politécnica Salesiana, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: EVALUACION DE LA EFICIENCIA ENERGETICA EN TRANSFORMADORES DE DISTRIBUCION BAJO DIFERENTES CONDICIONES DE CARGA, realizado por Fabricio Leonel Enriquez Morocho con documento de identificación N° 0106180383, obteniendo como resultado final el trabajo de titulación bajo la opción Artículo Académico que cumple con todos los requisitos determinados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Cuenca, 11 de marzo del 2026

Atentamente,

**PABLO DANIEL  
ROBLES LOVATO**  Firmado digitalmente por  
PABLO DANIEL ROBLES LOVATO  
Fecha: 2026.03.11 09:20:11  
-05'00'

---

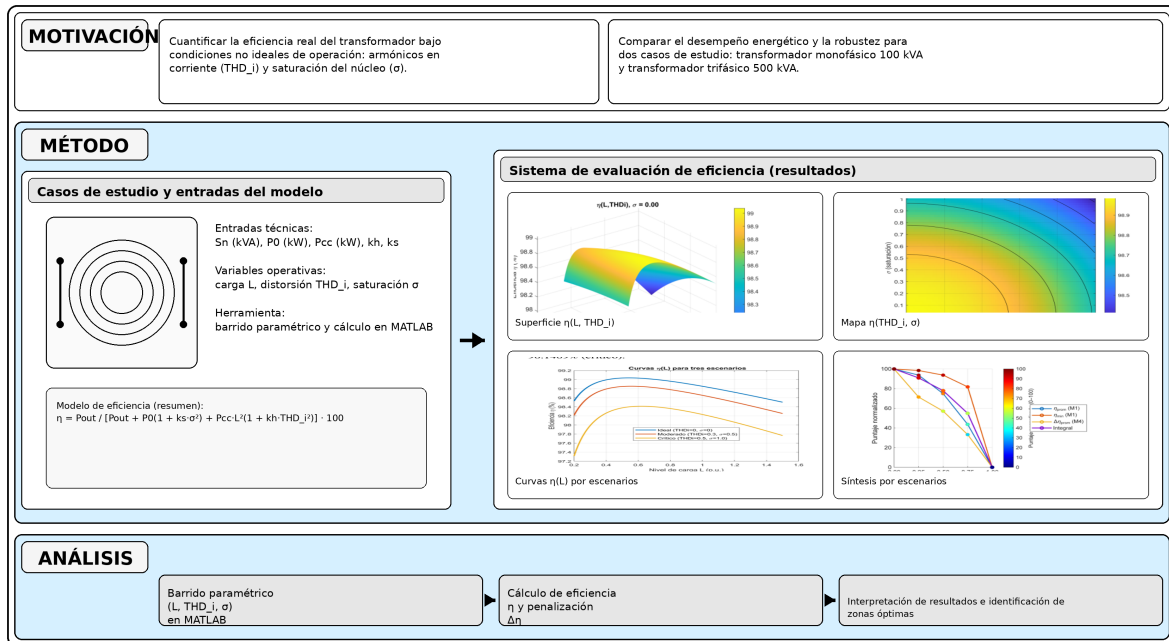
Ing. Pablo Daniel Robles Lovato, MsC.

0101663342

# Graphical Abstract

## Evaluación de la Eficiencia Energética en Transformadores de Distribución Bajo Diferentes Condiciones de Carga

Fabrizio Enriquez , Pablo Robles-Lovato



# Evaluación de la Eficiencia Energética en Transformadores de Distribución Bajo Diferentes Condiciones de Carga

Fabrizio Enriquez <sup>a</sup>, Pablo Robles-Lovato<sup>a,b,\*</sup>

<sup>a</sup>Programa en Ingeniería Eléctrica, Universidad Politécnica Salesiana, Cuenca-Ecuador

<sup>b</sup>Program in Electrical Engineering, Salesian Polytechnic University, Cuenca 010205, Ecuador

## ARTICLE INFO

### Keywords:

Distribution transformers, energy efficiency, harmonics, current THD, core saturation, load factor, copper and core losses, efficiency modeling.

## Abstract

This paper evaluates the energy efficiency of distribution transformers under non-ideal operating conditions by jointly considering the load level  $L$ , the current harmonic distortion  $THD_i$ , and a core saturation factor  $\sigma$ . A MATLAB-based parametric model is applied to a 100 kVA single-phase transformer and a 500 kVA three-phase transformer, using efficiency surfaces, scenario curves, and the efficiency penalty  $\Delta\eta = \eta_{ideal} - \eta_{real}$  as performance metrics. The results show that increasing THDi and  $\sigma$  reduces efficiency and increases penalties, with maximum  $\Delta\eta$  values of 1.2122% for the single-phase transformer and 1.0456% for the three-phase transformer.

Este trabajo evalúa la eficiencia energética de transformadores de distribución bajo condiciones de operación no ideales, considerando de manera conjunta el nivel de carga  $L$ , la distorsión armónica de corriente  $THD_i$  y un factor de saturación del núcleo  $\sigma$ . Se aplica un modelo paramétrico desarrollado en MATLAB a un transformador monofásico de 100 kVA y a uno trifásico de 500 kVA, empleando superficies de eficiencia, curvas por escenarios y la penalización  $\Delta\eta = \eta_{ideal} - \eta_{real}$  como métricas de desempeño. Los resultados muestran que el incremento de  $THD_i$  y  $\sigma$  reduce la eficiencia e incrementa las penalizaciones, alcanzando valores máximos de  $\Delta\eta$  de 1.2122% en el caso monofásico y 1.0456% en el trifásico.

## 1. Introducción

El creciente interés por sistemas eléctricos más eficientes, sostenibles y resilientes ha situado a la eficiencia energética en transformadores de distribución como un tema central dentro del ámbito de la ingeniería eléctrica moderna [5]. Dado su rol esencial en la adaptación de los niveles de voltaje para la entrega segura de energía a los usuarios finales, los transformadores de distribución representan un componente clave en la mejora del desempeño global de las redes eléctricas [21]. En este contexto, la eficiencia energética de estos equipos ha sido analizada desde diversas perspectivas, como el diseño óptimo, la selección de materiales, el impacto de cargas no lineales, el comportamiento térmico, la detección de fallas y la degradación de componentes [24, 20].

El cuerpo de literatura ha demostrado que el funcionamiento bajo condiciones no ideales, como armónicos, fluctuaciones, sobrecargas y desbalances de carga, representa un desafío técnico creciente en la gestión de transformadores [18]. A ello se suman condiciones ambientales adversas que afectan su desempeño y longevidad [20]. A pesar de los numerosos avances tecnológicos y metodológicos, la eficiencia energética de los transformadores sigue viéndose comprometida por diversos factores que no siempre se consideran en los modelos convencionales, especialmente cuando se combinan cargas variables, distorsión armónica

y fenómenos de saturación magnética.

En este marco, persiste un vacío en la evaluación sistemática de la eficiencia energética de los transformadores de distribución bajo condiciones de carga variables y realistas, que incluyan simultáneamente cargas lineales y no lineales, estados balanceados y desbalanceados, así como regímenes cercanos a la saturación. Aunque se han propuesto soluciones puntuales para problemas específicos, como la presencia de armónicos o el comportamiento térmico, aún falta una visión unificada que permita comparar el desempeño energético de estos equipos bajo distintos escenarios operativos [19, 24].

Frente a esta brecha, este trabajo propone un estudio exhaustivo que evalúa la eficiencia energética de transformadores de distribución mediante un modelo multivariable que integra el nivel de carga relativa  $L$ , la distorsión armónica de corriente  $THD_i$  y un factor de saturación del núcleo  $\sigma$ . El objetivo es caracterizar cuantitativamente el impacto combinado de estas condiciones sobre el desempeño energético de un transformador monofásico de 100 kVA y uno trifásico de 500 kVA, aportando criterios técnicos útiles para su selección, diseño y operación en redes modernas [5]. Los principales resultados muestran que niveles elevados de  $THD_i$  y  $\sigma$  pueden inducir penalizaciones de eficiencia superiores al 1% respecto del caso ideal y que un índice resumen normalizado (0–100) permite comparar de forma compacta distintos escenarios de operación. La estructura del artículo se organiza del siguiente modo: en la Sección 2 se revisan los principales trabajos relacionados, en la Sección 3 se describe la formulación del problema y la metodología propuesta, en la Sección 4 se presentan los resultados y análisis, en la Sección 5 se discuten los hallazgos y sus implicaciones, y en la Sección 6 se exponen las conclusiones y posibles líneas

\*Corresponding authors at: Salesian Polytechnic University, Cuenca-Ecuador

\*\*E-mail address:

✉ pcontreraso@est.ups.edu.ec (F.E.); probles@ups.edu.ec (P. Robles-Lovato)

ORCID(s): 0000-0000-0000-0000 (F.E.); 0000-0001-8673-3974 (P. Robles-Lovato)

futuras de investigación [21].

## 2. Trabajos Relacionados

La eficiencia energética de los transformadores de distribución ha sido un eje central de investigación en el contexto de redes eléctricas modernas, debido a su influencia directa en la calidad del suministro, la reducción de pérdidas y la sostenibilidad del sistema [18]. Como dispositivos esenciales en la infraestructura eléctrica, los transformadores están sometidos a condiciones operativas cada vez más complejas, marcadas por la proliferación de cargas no lineales, el crecimiento de la generación distribuida y exigencias más estrictas en normativas y eficiencia operativa.

Un número significativo de estudios ha abordado este desafío desde múltiples perspectivas. En el ámbito de la calidad de energía, [19] propone una técnica de detección avanzada para categorizar las causas de caídas de voltaje mediante procesamiento de señales (VDM y transformada S) combinado con redes neuronales profundas, alcanzando una tasa de reconocimiento del 98%. En paralelo, [11] presenta una estrategia de diseño óptimo de transformadores trifásicos sometidos a carga variable, utilizando simulaciones electromagnéticas bajo la metodología factorial  $2^4$  para reducir pérdidas técnicas, destacando la importancia de factores como la selección del núcleo ferromagnético y la geometría del devanado en la eficiencia global. En condiciones no ideales, la presencia de armónicos y la saturación del núcleo han sido reconocidas como causas relevantes de degradación del desempeño: [4] aborda esta problemática optimizando la ubicación de sensores de monitoreo en redes con resonancias armónicas, mientras que [3] muestra que las pérdidas armónicas pueden representar hasta el 22% de las pérdidas totales en transformadores industriales y propone ajustes a la norma ANSI/IEEE C57.110 para mejorar la estimación de resistencias de cortocircuito bajo carga desbalanceada y no lineal; trabajos adicionales emplean dispositivos de compensación y estrategias de control para mitigar estos efectos [17, 22, 2, 12].

El análisis vibracional ha permitido desarrollar métodos de diagnóstico no invasivo para transformadores. Por ejemplo, [10, 16] utilizan análisis de vibraciones mediante Wavelet Packet y emisiones acústicas tras impulsos de rayo para identificar alteraciones estructurales internas, incluso sin desmontaje del equipo. Complementando esta línea, [6] emplea algoritmos de aprendizaje conjunto basados en funciones modales empíricas y modelos de ensamble para detectar fallas mecánicas, consolidando la tendencia hacia mantenimiento predictivo basado en señales. Desde una perspectiva térmica, [1] desarrolla un modelo acoplado electromagnético-térmico que simula la distribución de temperatura en transformadores con cargas inestables, mientras que [7] aplica dinámica de fluidos computacional (CFD) para analizar el efecto del desbalance de cargas sobre el punto caliente, encontrando incrementos de temperatura significativos bajo sobrecargas; de forma complementaria, [23, 13] profundizan en el impacto de las condiciones de carga en la

distribución térmica interna y en la optimización de pérdidas.

Otros trabajos han puesto el foco en la degradación de materiales y en soluciones de regulación y protección. En [8] se evalúa la degradación del aceite dieléctrico en servicio mediante análisis cromatográfico y fisicoquímico, estableciendo su relación con la capacidad de aislamiento y la seguridad operativa. En el ámbito del control, [17] explora el uso de STATCOM con modulación SVPWM para regular la tensión en redes de media tensión, mientras que [22] mejora la discriminación de fallas internas en transformadores mediante esquemas diferenciales basados en transformadas Wavelet con compensación de fase. Para entornos extremos, [2] analiza criterios de diseño de transformadores destinados a aplicaciones offshore, expuestos a condiciones ambientales severas, y [12] desarrolla sistemas de aislamiento sísmico con elastómeros pseudorodantes orientados a mitigar daños durante eventos telúricos en transformadores de alta potencia.

En el dominio de la generación fotovoltaica y las aplicaciones industriales, [9] analiza las consideraciones específicas de diseño para transformadores en plantas solares, teniendo en cuenta elevados niveles de armónicos, resistencia a sobrecargas y compatibilidad electromagnética. En contextos de banco de transformadores y escenarios académicos, [14] modela transformadores bajo cargas distorsionadas empleando simulaciones y espectro armónico total, observando incrementos exponenciales en pérdidas por corrientes parásitas. El diagnóstico interno también ha evolucionado: [15] utiliza un modelo de impedancia tipo T para detectar deformaciones en bobinas tras pruebas de cortocircuito, mientras que [23] introduce técnicas que transforman señales temporales en representaciones de imagen para su evaluación con arquitecturas de redes neuronales profundas, alcanzando clasificaciones precisas incluso ante fallas poco evidentes. De manera complementaria, [13] propone una metodología jerárquica para minimizar pérdidas en transformadores rectificadores industriales mediante el ajuste óptimo de la impedancia de los devanados, contribuyendo a mejorar la eficiencia desde el diseño interno.

La Tabla 1 resume de forma estructurada estos trabajos, organizándolos según objetivos (por ejemplo, análisis de pérdidas, planificación, resiliencia, protección y estrategias de reconfiguración), parámetros considerados (reconfiguración, presencia de generación distribuida, flujo de potencia) y tópicos de aplicación. La revisión expone una gama amplia de contribuciones que abordan aspectos térmicos, eléctricos, estructurales y funcionales del rendimiento de los transformadores; sin embargo, persiste la necesidad de modelos integradores que cuantifiquen simultáneamente el efecto combinado de condiciones reales como la distorsión armónica, la carga variable y la saturación magnética sobre la eficiencia energética de estos dispositivos. Esta laguna es precisamente el espacio que aborda el presente estudio, al proponer un marco de evaluación de eficiencia basado en la función  $\eta(L, THD_i, \sigma)$  y métricas sintéticas que permitan comparar escenarios de operación en transformadores de distribución.

**Table 1**

 Summary of related studies on multivariable transformer efficiency modeling considering  $L$ ,  $THD_i$ , and  $\sigma$ 

Author, Year	Objectives	Parameters					Topic		
		Reconfiguration	Planning	Resilience	Protection	Optimization	Reconfiguration	DG	Power Flow
C. Andrada, V. León, 2023 [3]	Load loss analysis under IEEE C57.110 standard	-	✓	-	✓	-	-	-	✓
Grau, Hernández, 2024 [14]	Harmonic losses in transformer banks	-	✓	✓	-	✓	-	-	✓
Morteza, Jawad, 2020 [20]	Thermal losses under harmonics	-	✓	✓	-	✓	-	-	-
Abdali, Guerrero, 2024 [1]	Unbalanced load impact on oil transformers	-	✓	✓	-	-	-	-	✓
Bdali, Rabiee, 2023 [7]	CFD-based thermal behavior with voltage unbalance	-	✓	✓	-	✓	-	-	-
Dori, Dönük, 2021 [11]	Optimal transformer design with load	✓	✓	-	-	✓	✓	-	-
Yanzheng, Chenhao, 2024 [24]	Overload prediction in nonlinear data	-	✓	✓	-	✓	-	-	-
Bokoro, Thango, 2022 [9]	PV plant transformer considerations	✓	✓	-	-	✓	✓	✓	-
Fang, Jianfeng, 2025 [13]	Loss optimization via impedance matching	-	✓	-	-	✓	-	-	-
Gu, Song, 2022 [15]	Frequency-dependent short-circuit impedance	-	✓	-	✓	-	-	-	✓
<b>Present work</b>	Multivariable efficiency assessment under harmonics and core saturation	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓

### 3. Formulación del Problema y Metodología

En los sistemas eléctricos modernos, los transformadores de distribución constituyen un componente crítico para la entrega eficiente de energía; sin embargo, su operación está inevitablemente asociada a pérdidas que afectan directamente la eficiencia global. De manera general, dichas pérdidas se clasifican en pérdidas en vacío, asociadas al núcleo magnético (histéresis y corrientes parásitas), y pérdidas en carga, asociadas al calentamiento resistivo de los devanados debido a la circulación de corriente. En enfoques idealizados, la eficiencia suele modelarse únicamente como función del nivel de carga; no obstante, esta aproximación resulta insuficiente en redes reales, donde la presencia de cargas no lineales introduce corrientes armónicas que incrementan las pérdidas dependientes de corriente, y donde la saturación del núcleo provoca un aumento adicional de las pérdidas en vacío. En conjunto, estos fenómenos pueden degradar el desempeño energético, desplazar el punto de máxima eficiencia y comprometer la operación del transformador bajo condiciones no ideales.

Con base en esta motivación, se propone un modelo multivariable de eficiencia energética que integra tres variables operativas relevantes: el nivel de carga relativa  $L$ , el índice de distorsión armónica de corriente  $THD_i$  y el factor de saturación del núcleo  $\sigma$ . El modelo emplea como parámetros de entrada la potencia nominal  $S_n$  [kVA], las pérdidas en vacío a tensión nominal  $P_0$  [kW] y las pérdidas en carga a plena carga  $P_{cc}$  [kW]. La eficiencia se define como la relación entre la potencia útil entregada y la potencia total absorbida, expresada en porcentaje, de acuerdo con:

$$\eta = \frac{P_{salida}(L)}{P_{salida}(L) + P_{perd}(L, THD_i, \sigma)} \cdot 100 \quad (1)$$

donde  $P_{salida}(L) = L S_n$  representa la potencia útil entregada al nivel de carga  $L$ . Las pérdidas totales se definen como

$$P_{perd}(L, THD_i, \sigma) = P_{vacio}(\sigma) + P_{carga}(L, THD_i), \quad (2)$$

siendo las pérdidas en vacío  $P_{vacio}(\sigma) = P_0 (1 + k_s \sigma^2)$ , que incorpora el incremento debido a la saturación del núcleo, y las pérdidas en carga  $P_{carga}(L, THD_i) = P_{cc} L^2 (1 + k_h THD_i^2)$ , que incorporan tanto la dependencia cuadrática con el nivel de carga como el incremento asociado a la distorsión armónica de corriente.

En este marco, los coeficientes  $k_s$  y  $k_h$  se interpretan como **coeficientes de calibración** obtenidos mediante diseño experimental y ajuste paramétrico, apoyados en referencias técnicas y/o ensayos específicos, con el objetivo de cuantificar de forma controlada el efecto relativo de la saturación y de los armónicos sobre las pérdidas correspondientes, evitando su tratamiento como parámetros puramente empíricos. En la implementación computacional, la expresión de la eficiencia definida en (1) se evalúa de forma explícita como:

$$\eta = 100 \cdot \frac{L S_n}{L S_n + P_0 (1 + k_s \sigma^2) + P_{cc} L^2 (1 + k_h THD_i^2)} \quad (3)$$

Para aplicar la formulación de manera sistemática, la metodología se estructuró como un análisis reproducible

en MATLAB, que inicia con la selección de parámetros nominales representativos del transformador y continúa con la generación de un espacio de simulación tridimensional  $(L, \text{THD}_i, \sigma)$ , restringido a rangos de operación técnicamente realistas. En este trabajo se analizaron dos casos de estudio: un transformador monofásico con  $S_n = 100 \text{ kVA}$ ,  $P_0 = 0.263 \text{ kW}$  y  $P_{cc} = 0.897 \text{ kW}$ , y un transformador trifásico con  $S_n = 500 \text{ kVA}$ ,  $P_0 = 1.09 \text{ kW}$  y  $P_{cc} = 5.77 \text{ kW}$ . En ambos casos se emplearon  $k_h = 1.8$  y  $k_s = 0.9$  como parámetros de calibración constantes, con el fin de preservar la comparabilidad entre configuraciones.

El nivel de carga se exploró en el rango  $L \in [0.2, 1.5]$  p.u., abarcando desde operación ligera hasta sobrecarga moderada. La distorsión armónica se evaluó en el intervalo  $\text{THD}_i \in [0, 0.5]$  en forma adimensional (equivalente a 0–50% en notación porcentual), mientras que la saturación se examinó en  $\sigma \in [0, 1]$ . Para capturar las tendencias con resolución suficiente,  $L$  y  $\text{THD}_i$  se discretizaron en mallas uniformes de 100 puntos cada una, mientras que  $\sigma$  se analizó tanto de forma continua para la generación de mapas como mediante niveles representativos  $\{0, 0.25, 0.5, 0.75, 1\}$  para comparaciones directas entre distintos estados de saturación.

Con el dominio definido, la eficiencia  $\eta(L, \text{THD}_i, \sigma)$  se calculó en toda la malla, permitiendo construir superficies y mapas que facilitan la interpretación del efecto individual y combinado de cada variable operativa. La metodología se concibió como una progresión desde un caso base ideal ( $\text{THD}_i = 0, \sigma = 0$ ) hacia escenarios no ideales, con el objetivo de analizar la degradación del desempeño y el desplazamiento del punto de máxima eficiencia. En la primera etapa de resultados se generaron **gráficas de comportamiento** (Figuras 1–5), que incluyen superficies  $\eta(L, \text{THD}_i)$  para distintos niveles de  $\sigma$ , un mapa  $\eta(\text{THD}_i, \sigma)$  para una carga fija representativa  $L = 0.75$ , curvas  $\eta(L)$  bajo escenarios ideal, moderado y crítico, un mapa de penalización  $\Delta\eta = \eta_{\text{ideal}} - \eta_{\text{real}}$ , y la identificación de regiones operativas mediante el umbral  $\eta \geq 95\%$ . Posteriormente, con el fin de transformar estas representaciones gráficas en indicadores comparables de lectura ejecutiva, se aplicó un post-procesamiento de síntesis que normaliza los resultados (0–100) y calcula un índice integral ponderado. Esta segunda etapa produce las métricas reportadas como Figuras 6–9, acompañadas de estadísticos de mínimo, máximo y valor medio que respaldan cuantitativamente la interpretación.

#### 4. Análisis de resultados

En el dominio evaluado, la eficiencia se mantiene elevada en ambos transformadores; sin embargo, deja de ser estrictamente constante cuando se incorporan explícitamente los efectos de la distorsión armónica y la saturación del núcleo. En particular, el **diferencial máximo de rendimiento** respecto al caso ideal alcanza  $\Delta\eta_{\text{max}} = 1.2122\%$  en el transformador monofásico y  $\Delta\eta_{\text{max}} = 1.0456\%$  en el transformador trifásico, lo que evidencia que, bajo combinaciones severas de carga, contenido armónico y saturación, la degradación de eficiencia puede superar el 1% (Fig. 4).

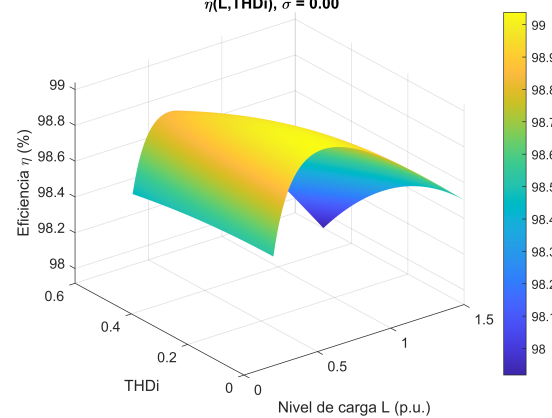
**Table 2**

Resumen global de eficiencia  $\eta$  (%) por saturación  $\sigma$  (dominio evaluado).

$\sigma$	Monofásico 100 kVA		Trifásico 500 kVA	
	$\eta_{\text{mean}}$	$[\eta_{\text{min}}, \eta_{\text{max}}]$	$\eta_{\text{mean}}$	$[\eta_{\text{min}}, \eta_{\text{max}}]$
0.00	98.7285	[97.9180, 99.0379]	98.5530	[97.4134, 99.0068]
0.25	98.7059	[97.9085, 99.0115]	98.5344	[97.4056, 98.9795]
0.50	98.6383	[97.8802, 98.9362]	98.4784	[97.3824, 98.9019]
0.75	98.5260	[97.8083, 98.8218]	98.3854	[97.3436, 98.7838]
1.00	98.3693	[97.3154, 98.6787]	98.2556	[97.2894, 98.6361]

Para complementar la lectura visual de las superficies y mapas, se resumieron en forma tabular los estadísticos globales de eficiencia en el dominio evaluado para cada nivel de saturación. La Tabla 2 permite comparar de manera directa cómo el incremento de  $\sigma$  desplaza los valores mínimo, máximo y promedio de  $\eta$  en ambos transformadores, mostrando una reducción sistemática de la eficiencia media conforme aumenta la saturación del núcleo, así como una contracción gradual del mejor desempeño alcanzable dentro del dominio.

En el caso monofásico, el comportamiento base se aprecia mediante la superficie  $\eta(L, \text{THD}_i)$  en condición ideal de saturación ( $\sigma = 0$ ), donde el desempeño global alcanza un máximo de  $\eta_{\text{max}} = 99.0379\%$  y un valor medio  $\eta_{\text{mean}} = 98.7285\%$  dentro del dominio  $(L, \text{THD}_i)$ . La exploración por niveles de saturación confirma que el incremento de  $\sigma$  eleva las pérdidas en vacío y desplaza el desempeño global hacia valores ligeramente menores; al llegar a  $\sigma = 1$ , la media disminuye a  $\eta_{\text{mean}} = 98.3693\%$ , el máximo cae a  $\eta_{\text{max}} = 98.6787\%$  y el mínimo global del dominio desciende a  $\eta_{\text{min}} = 97.3154\%$ . En todos los casos, el mejor desempeño se preserva cuando  $\text{THD}_i$  tiende a cero, lo que reafirma el rol dominante de la distorsión armónica en la penalización de pérdidas en carga, aun cuando la saturación incrementa el componente de pérdidas en vacío (Fig. 1).



**Figure 1:** Superficie  $\eta(L, \text{THD}_i)$  para  $\sigma = 0$  (MATLAB).

Para analizar el efecto combinado de armónicos y saturación en un punto operativo representativo, se fijó  $L = 0.75$  y se construyó el mapa  $\eta(\text{THD}_i, \sigma)$ . En este plano, la eficiencia varía entre  $\eta_{\text{max}} = 98.9870\%$  (con  $\text{THD}_i = 0$  y  $\sigma = 0$ ) y  $\eta_{\text{min}} = 98.3848\%$  (con  $\text{THD}_i = 0.5$  y  $\sigma = 1$ ), con un valor medio  $\eta_{\text{mean}} = 98.7840\%$ . Este resultado muestra que, aun con carga fija, la eficiencia se degrada de forma progresiva

cuando aumentan simultáneamente la distorsión armónica y la saturación, en concordancia con el modelo que incrementa las pérdidas en carga y en vacío de manera concurrente. En términos operativos, el mapa permite identificar rápidamente regiones de mayor sensibilidad a  $THD_i$  para niveles altos de  $\sigma$ , donde la pendiente de degradación se intensifica (Fig. 2).

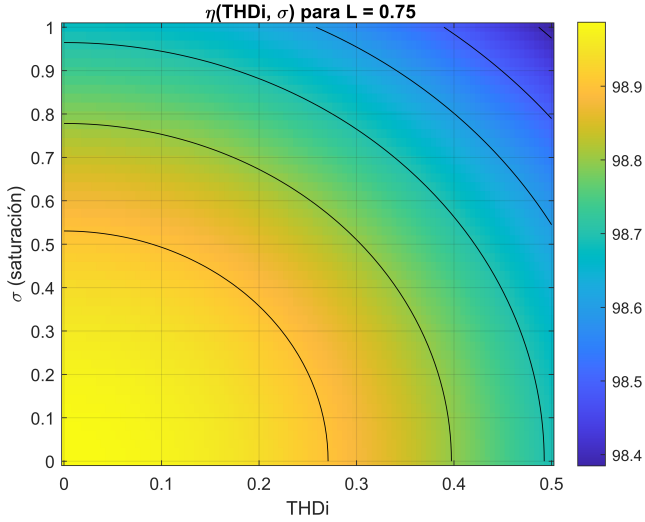


Figure 2: Mapa  $\eta(THD_i, \sigma)$  con  $L = 0.75$  (MATLAB).

La evolución de la eficiencia con el nivel de carga se describe con mayor claridad al comparar  $\eta(L)$  bajo escenarios ideal, moderado y crítico, definidos como  $(THD_i, \sigma) = (0, 0)$ ,  $(0.3, 0.5)$  y  $(0.5, 1)$ , respectivamente. En el escenario ideal, el máximo  $\eta_{max} = 99.0379\%$  se alcanza alrededor de  $L \approx 0.5414$ , mientras que en el escenario moderado el máximo disminuye a  $\eta_{max} = 98.8543\%$  y se ubica en  $L \approx 0.5545$ ; en el escenario crítico, el máximo desciende a  $\eta_{max} = 98.4132\%$  y se desplaza a  $L \approx 0.6202$ . De manera consistente, la eficiencia media se reduce de  $\eta_{mean} = 98.8404\%$  (ideal) a  $\eta_{mean} = 98.1489\%$  (crítico). El corrimiento de la “carga óptima” hacia valores mayores se interpreta como consecuencia del rebalanceo entre pérdidas en vacío, intensificadas por la saturación, y pérdidas en carga, intensificadas por armónicos, que altera la condición de máxima eficiencia: a medida que aumentan las pérdidas independientes de carga, resulta necesario operar a una fracción de carga superior para maximizar  $\eta$  (Fig. 3).

Con el fin de cuantificar las diferencias entre condiciones operativas representativas, se consolidaron los resultados en tres escenarios: ideal, moderado y crítico. La Tabla 3 presenta los valores mínimo, máximo y promedio de  $\eta$  para cada escenario en ambos transformadores, permitiendo contrastar la reducción de eficiencia y la pérdida de robustez (disminución de  $\eta_{min}$ ) cuando se incrementan simultáneamente  $THD_i$  y  $\sigma$ . En conjunto, estos estadísticos proporcionan una lectura compacta del compromiso entre desempeño promedio y peor caso dentro del dominio.

La magnitud de la degradación respecto al caso base se cuantificó mediante la penalización  $\Delta\eta = \eta_{ideal} - \eta_{real}$ . En promedio, la penalización aumenta con la saturación:

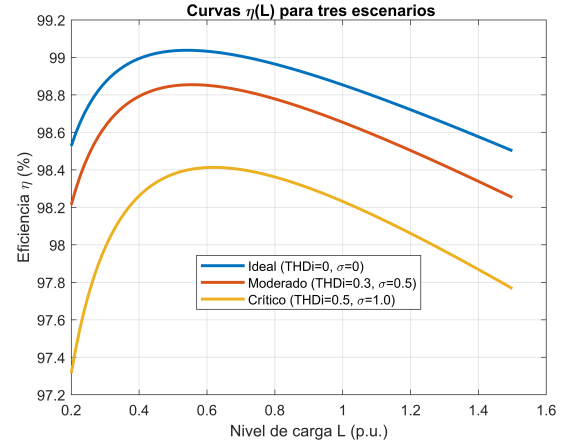


Figure 3: Curvas  $\eta(L)$  por escenarios (MATLAB).

Table 3

Comparación por escenarios: eficiencia media y máximo (con carga óptima aproximada).

Esc.	$THD_i$	$\sigma$	$\eta_{mean}^{(M)}$	$\eta_{max}^{(M)} (L^*)$	$\eta_{mean}^{(I)}$
Ideal	0.0	0.0	98.8404	99.0379 (0.5414)	98.6963
Moderado	0.3	0.5	98.6299	98.8543 (0.5545)	98.4676
Crítico	0.5	1.0	98.1489	98.4132 (0.6202)	97.9733

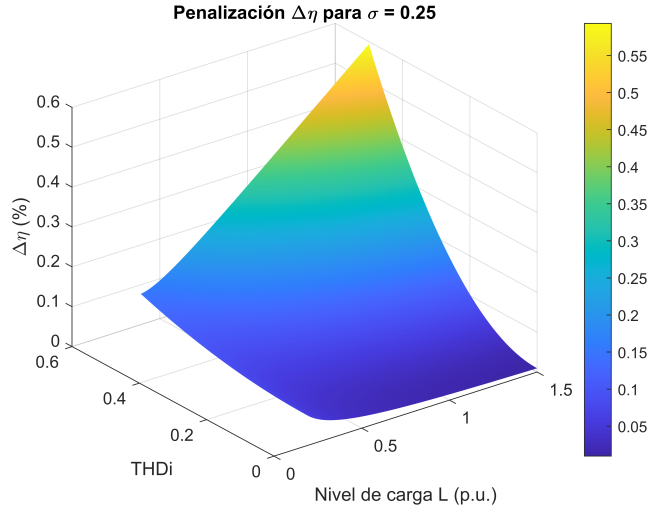


Figure 4: Penalización  $\Delta\eta$  para  $\sigma = 0.25$  (MATLAB).

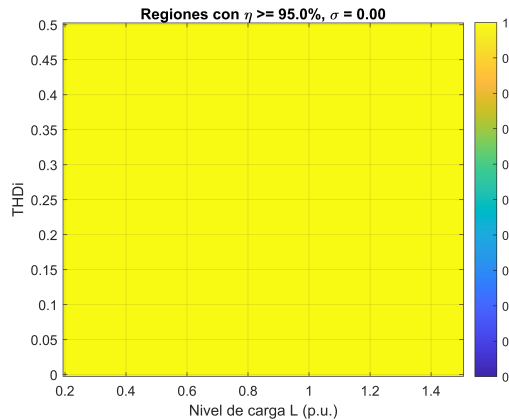
$\Delta\eta_{mean}$  pasa de 0.1345% para  $\sigma = 0.25$  hasta 0.4711% para  $\sigma = 1$ . El peor caso alcanza  $\Delta\eta_{max} = 1.2122\%$ , confirmando que la combinación de elevada distorsión armónica y regímenes extremos de carga puede producir degradaciones superiores al 1% respecto del caso ideal (Fig. 4). Esta métrica, al referirse directamente a la brecha frente a una referencia ideal, resulta particularmente útil para dimensionar el impacto energético de operar en condiciones no nominales.

La degradación respecto al caso ideal se cuantificó mediante la penalización  $\Delta\eta = \eta_{ideal} - \eta_{real}$ . Para facilitar la comparación entre transformadores y niveles de saturación, la Tabla 4 resume los estadísticos mínimo, máximo y prome-

**Table 4**

 Penalty statistics  $\Delta\eta$  (%) by saturation level  $\sigma$  (single-phase vs. three-phase).

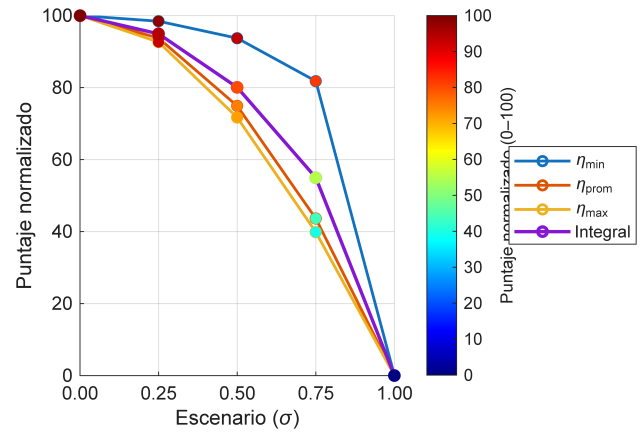
$\sigma$	Single-phase 100 kVA			Three-phase 500 kVA		
	$\Delta\eta_{\min}$	$\Delta\eta_{\max}$	$\Delta\eta_{\text{mean}}$	$\Delta\eta_{\min}$	$\Delta\eta_{\max}$	$\Delta\eta_{\text{mean}}$
0.25	0.0096	0.5934	0.1345	0.0079	0.7526	0.1619
0.50	0.0383	0.6218	0.2020	0.0315	0.7758	0.2179
0.75	0.0860	0.7193	0.3144	0.0708	0.8146	0.3109
1.00	0.1529	1.2122	0.4711	0.1259	1.0456	0.4407


**Figure 5:** Regiones  $\eta \geq 95\%$  (MATLAB).

dio de  $\Delta\eta$  para  $\sigma \in \{0.25, 0.5, 0.75, 1\}$ . Los resultados muestran que el peor caso supera el 1% en ambos equipos, alcanzando  $\Delta\eta_{\max} = 1.2122\%$  en el caso monofásico y  $\Delta\eta_{\max} = 1.0456\%$  en el trifásico. Además, el incremento de  $\Delta\eta_{\text{mean}}$  con  $\sigma$  confirma que la saturación no solo afecta eventos extremos, sino que también deteriora de manera sistemática el desempeño promedio dentro del dominio.

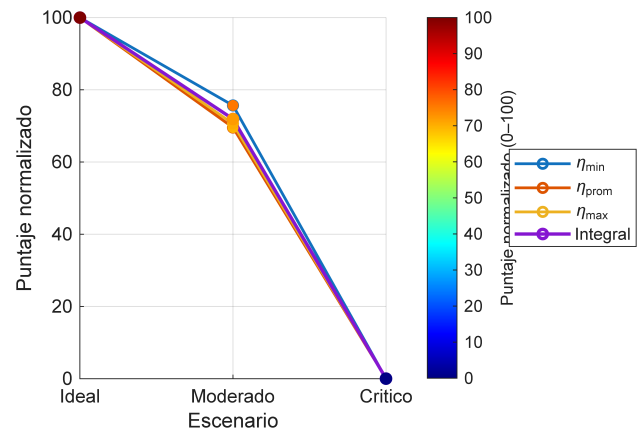
Como criterio exploratorio para identificar regiones de operación preferibles, se evaluó un umbral binario  $\eta \geq 95\%$ . En el dominio analizado, el mapa resultante clasifica el 100% del área como “aceptable” para todos los valores de  $\sigma$ , lo que indica que este umbral no discrimina adecuadamente entre escenarios en los casos estudiados. En consecuencia, para análisis operativos más exigentes se recomienda emplear umbrales superiores (por ejemplo, 98% o 99%), que permitan separar regiones con degradación energética relevante y, por tanto, apoyar decisiones de operación o diseño con mayor sensibilidad (Fig. 5).

Como complemento a las Figuras 1–5 y a las Tablas 2–4, se aplicó un post-proceso para sintetizar los resultados en métricas normalizadas (0–100) de lectura ejecutiva (Figuras 6–9). Estas métricas condensan el peor caso, el caso promedio y el mejor caso dentro del dominio, e incorporan un índice integral ponderado para comparar, de manera directa, niveles de saturación y escenarios operativos. Para variables tipo costo, como la penalización  $\Delta\eta$ , la normalización se invirtió con el fin de mantener un criterio uniforme: valores más altos representan una condición más favorable (menor degradación).


**Figure 6:** Métrica normalizada M1 por saturación  $\sigma$ :  $\eta_{\min}$ ,  $\eta_{\text{prom}}$  y componente integral (0–100) monofásico 100 kVA (MATLAB).

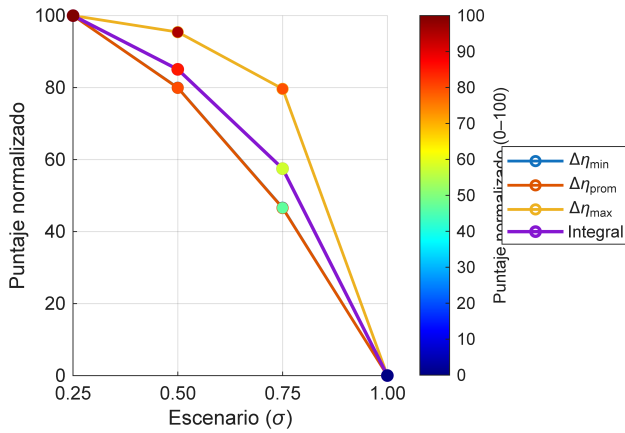
La Figura 6 corrobora la tendencia reportada en la Tabla 2: la reducción del puntaje integral con el incremento de  $\sigma$  se asocia a la disminución simultánea de  $\eta_{\text{prom}}$  y  $\eta_{\min}$ , reflejando una pérdida gradual tanto en desempeño promedio como en la robustez del peor caso.

En la Figura 7 se observa una degradación consistente del puntaje integral al pasar del escenario ideal al crítico, en concordancia con la disminución de  $\eta_{\max}$  y  $\eta_{\text{prom}}$  reportada en la Tabla 3. Este resumen facilita comparar el impacto agregado de  $(\text{THD}_i, \sigma)$  sin depender exclusivamente de la inspección visual de las curvas de la Figura 3.


**Figure 7:** Métrica normalizada M3 por escenarios (ideal/moderado/crítico): comparación de  $\eta_{\min}$ ,  $\eta_{\text{prom}}$ ,  $\eta_{\max}$  e índice integral monofásico 100 kVA (MATLAB).

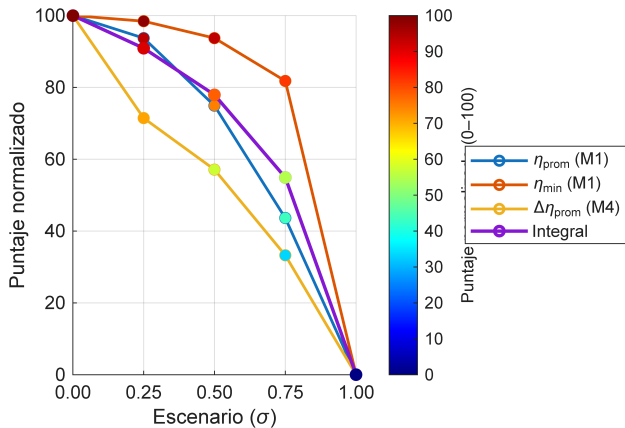
La Figura 8 amplifica la lectura de la Tabla 4 al transformar las penalizaciones en puntajes comparables; de este modo, el incremento de  $\Delta\eta_{\max}$  y  $\Delta\eta_{\text{prom}}$  con  $\sigma$  se traduce en una reducción monótona del índice integral, destacando la pérdida relativa de desempeño bajo condiciones de saturación, tanto en el extremo (peor caso) como en el comportamiento típico del dominio.

Finalmente, la Figura 9 integra en una sola curva el comportamiento de eficiencia y penalización para cada trans-



**Figure 8:** Métrica normalizada M4 de penalización por saturación:  $\Delta\eta_{\min}$ ,  $\Delta\eta_{\text{prom}}$ ,  $\Delta\eta_{\max}$  (normalización invertida) e índice integral monofásico 100 kVA (MATLAB).

formador, permitiendo una comparación directa de sensibilidad a la saturación. En conjunto con las Tablas 2–4, este índice provee una lectura compacta del compromiso entre desempeño energético (beneficio), robustez (peor caso) y degradación relativa frente al ideal (costo invertido) bajo condiciones no ideales.



**Figure 9:** Índice integral ponderado en función de  $\sigma$  que combina beneficio (eficiencia promedio), robustez (eficiencia mínima) y costo invertido (penalización promedio) monofásico 100 kVA (MATLAB).

## 5. Discusión

Los resultados obtenidos evidencian que la eficiencia energética de los transformadores de distribución, si bien se mantiene elevada dentro del dominio evaluado, no es invariante frente a condiciones reales de operación. En particular, el desempeño se ve afectado por la presencia de cargas no lineales y por fenómenos asociados al núcleo magnético, los cuales alteran el balance global de pérdidas y, en consecuencia, la eficiencia final del equipo.

El modelo propuesto incorpora explícitamente dos mecanismos principales de degradación. El primero corresponde al incremento de las pérdidas en carga debido a la

distorsión armónica de corriente, representado mediante el término asociado a  $k_h \text{THD}_i^2$ , que amplifica las pérdidas resistivas en los devanados conforme aumenta el contenido armónico. El segundo mecanismo corresponde al aumento de las pérdidas en vacío producto de la saturación del núcleo, capturado por el término  $k_s \sigma^2$ , el cual penaliza la eficiencia incluso en regímenes de carga moderada. La inclusión conjunta de ambos efectos permite representar de forma más realista el comportamiento energético del transformador bajo escenarios no ideales.

A partir de las métricas M1 y M2 se observa una reducción sistemática de la eficiencia  $\eta$  conforme aumentan  $\text{THD}_i$  y  $\sigma$ , confirmando que la degradación se intensifica cuando ambos factores actúan simultáneamente. Bajo condiciones cercanas a  $\text{THD}_i \approx 0$  se obtiene el desempeño más favorable, lo que reafirma que la operación con corrientes aproximadamente sinusoidales minimiza las pérdidas adicionales y sostiene niveles de eficiencia elevados. En contraste, para valores elevados de distorsión armónica y saturación, las superficies y mapas de eficiencia muestran un desplazamiento progresivo hacia regiones de menor desempeño, reflejando la sensibilidad del transformador ante condiciones de red cada vez más exigentes.

La métrica M3 aporta una interpretación adicional al evidenciar que el punto de máxima eficiencia se ubica en cargas intermedias y que dicho punto se desplaza cuando varían  $\text{THD}_i$  y  $\sigma$ . Este comportamiento responde al equilibrio entre pérdidas en vacío, predominantes a cargas bajas, y pérdidas en carga, dominantes a cargas elevadas. En consecuencia, al incrementarse los armónicos y la saturación, el máximo de eficiencia se desplaza hacia niveles de carga ligeramente mayores, ya que el costo relativo de operar a cargas bajas aumenta debido a la intensificación simultánea de ambos tipos de pérdidas.

Los resultados de la métrica M4 confirman que la degradación de eficiencia puede superar el 1% bajo condiciones severas de operación. Este efecto resulta particularmente relevante en aplicaciones con alta penetración de cargas no lineales, tales como variadores de velocidad, convertidores electrónicos de potencia o infraestructura de recarga, donde incluso degradaciones porcentuales moderadas pueden traducirse en incrementos acumulados significativos de pérdidas energéticas y en mayores exigencias térmicas a lo largo del ciclo de vida del transformador.

Por otra parte, la métrica M5, basada en un umbral de  $\eta \geq 95\%$ , clasifica prácticamente la totalidad del dominio evaluado como aceptable, lo que limita su capacidad discriminante en los casos analizados. Este resultado sugiere que, para transformadores con elevados niveles de eficiencia base, resulta más apropiado emplear umbrales más exigentes (por ejemplo, 98% o 99%) si se desea identificar regiones preferibles de operación y diferenciar con mayor precisión escenarios con degradación significativa.

Finalmente, la estrategia de síntesis basada en indicadores normalizados y en un índice integral permite consolidar de forma efectiva la información generada por las distintas métricas. Este enfoque facilita la comparación entre

escenarios de saturación y condiciones operativas en términos de desempeño energético global, robustez y penalización relativa respecto al caso ideal, proporcionando un marco interpretativo coherente para el análisis, diseño y operación de transformadores en redes de distribución modernas.

## 6. Conclusiones

En este trabajo se desarrolló un marco de evaluación reproducible en MATLAB para analizar la eficiencia energética  $\eta(L, \text{THD}_i, \sigma)$  de transformadores de distribución bajo condiciones no ideales de operación. El enfoque propuesto integra cinco métricas visuales y cuantitativas (M1–M5), lo que permite caracterizar el desempeño del transformador a lo largo de su dominio operativo y, al mismo tiempo, disponer de indicadores comparables para contrastar distintos escenarios de carga, distorsión armónica y saturación.

Los resultados obtenidos en ambos modelos analizados evidencian que la eficiencia disminuye de manera sistemática cuando se incrementan  $\text{THD}_i$  y  $\sigma$ , confirmando la sensibilidad del transformador frente a la distorsión armónica de corriente y a los efectos asociados a la saturación del núcleo. En particular, las condiciones cercanas a  $\text{THD}_i \rightarrow 0$  conducen al desempeño más favorable, reafirmando que la operación con corrientes aproximadamente sinusoidales reduce pérdidas adicionales y sostiene valores elevados de eficiencia energética.

Para el transformador monofásico, la eficiencia media global se reduce desde 98.7285% cuando  $\sigma = 0$  hasta 98.3693% cuando  $\sigma = 1$ , alcanzándose una penalización máxima de  $\Delta\eta_{\max} = 1.2122\%$ . De manera análoga, en el transformador trifásico la eficiencia media disminuye de 98.5530% a 98.2556% en el mismo rango de saturación, con una penalización máxima de  $\Delta\eta_{\max} = 1.0456\%$ . Aunque estas variaciones son moderadas en términos porcentuales, su impacto práctico resulta relevante al considerar la acumulación de pérdidas energéticas y el aumento de las exigencias térmicas a lo largo del ciclo de vida del equipo.

Adicionalmente, el análisis de la métrica M5 mostró que el umbral  $\eta \geq 95\%$  no discrimina adecuadamente regiones óptimas dentro del dominio evaluado, dado que el 100% del área cumple dicho criterio en los casos estudiados. En consecuencia, si el objetivo es identificar zonas preferibles de operación y diferenciar con mayor precisión escenarios con degradación significativa, se recomienda adoptar umbrales más exigentes, acordes con los niveles de eficiencia base característicos de transformadores de distribución modernos.

Finalmente, se comprobó que la síntesis de resultados mediante puntajes normalizados (0–100) y un índice integral constituye una herramienta efectiva para resumir la información aportada por las métricas y comunicar de manera clara las tendencias globales de degradación en función de  $\sigma$  y  $\text{THD}_i$ . Este enfoque facilita la comparación directa entre configuraciones monofásicas y trifásicas, y aporta una base sólida para estudios de evaluación energética, apoyo al diseño y definición de criterios de operación en redes de distribución con creciente presencia de cargas no lineales.

## Declaration of Competing Interest

The authors declare that they have no known competing financial interests or personal relationships that could have appeared to influence the work reported in this paper.

## CRedit authorship contribution statement

**Fabricio Enriquez** : Methodology, Software, Formal analysis, Investigation, Writing. **Pablo Robles-Lovato**: Conceptualization, Methodology, Software, Formal analysis, Investigation, Writing - original draft, Writing - review & editing, Visualization.

## Acknowledgments

This work was financially funded by the Smart Grid Research Group (GIREI) of Salesian Polytechnic University (Project: ICT for Education) and the Power Grids and Smart Cities (RECI).

## References

- [1] Abdali, A., Abedi, A., Guerrero, J., Masoumkhani, H., Mazlumi, K., Rabiee, A., 2024. Liquid-immersed distribution transformers thermal analysis with consideration of unbalanced load current effect. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation* 31, 339–349. doi:10.1109/TDEI.2023.3295760.
- [2] Ahn, H.M., Hong, D.K., Oh, Y., Park, J.K., Song, K.D., 2025. Optimum design of transformers for offshore wind power generators considering their behavior. *Electronics* 14, 1–11. doi:10.3390/electronics14020233.
- [3] Andrada, C., León, V., Peñalvo, E., Sáiz, J., 2023. Load losses and short-circuit resistances of distribution transformers according to IEEE standard C57.110. *Inventions* 8, 154–169. doi:10.3390/inventions8060154.
- [4] Ansari, H., Esmaili, S., Rezaeian, M., Shakeri, S., 2022. Optimal power quality monitor placement to ensure reliable monitoring of sensitive loads in the presence of voltage sags and harmonic resonances conditions. *Electric Power Systems Research* 212, 378–396. doi:10.1016/j.epsr.2022.108623.
- [5] Arun, M., Samal, S., Barik, D., Chandran, S., Tudu, K., Praveenkumar, S., 2025. Integration of energy storage systems and grid modernization for reliable urban power management toward future energy sustainability. *Journal of Energy Storage* 114, 252–275. doi:10.1016/j.est.2025.115830.
- [6] Baidi, S., Yongfeng, J., Wei, X., Jingyu, S., Meng, L., Zixing, L., 2025. Power transformer vibration analysis model based on ensemble learning algorithm. *IEEE Access* 13, 37812–37827. doi:10.1109/ACCESS.2025.3542355.
- [7] Bdali, A., Moosumkhani, H., Rabiee, A., 2023. Accurate and nonuniform CFD-based thermal behavior analysis of distribution transformers: voltage imbalance effect. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering* 45. doi:10.1007/s40430-023-04516-z.
- [8] Bilal, A., Ehtasham, M., Malik, I.A., Rahmat, U., Ramy, A., 2024. Degradation assessment of in-service transformer oil based on electrical and chemical properties. *Applied Sciences* 14, 1–16. doi:10.3390/app142411767.
- [9] Bokoro, P., Thango, B., 2022. Defining and specifying design considerations for distribution transformers in large-scale solar photovoltaic plants. *Energies* 15, 2273–2291. doi:10.3390/en15082773.
- [10] Chen, Y., Li, P., Liu, D., 2023. Dry-type amdt fault detection based on vibration signal analysis by wavelet packet. *CES Transactions on Electrical Machines and Systems* 7, 341–349. doi:10.30941/CESTEMS.2023.00023.
- [11] dori, O.A., Dönük, A., akar, B., 2021. Optimal design and performance analysis of three-phase distribution transformer with variable loading. *Electric Power Components and Systems* 50, 458–468. doi:10.1080/15325008.2022.2136301.
- [12] Ehsan, G., Hamid, T., 2025. Seismic-isolation of a high-voltage power transformer with pseudo-rolling elastomeric isolators: Design, evaluation, and implementation. *Engineering Structures* 329, 1–20. doi:10.1016/j.engstruct.2025.119753.
- [13] Fang, L., Jianfeng, L., Qianyi, L., Yi, Y., Yong, L., 2025. A hierarchical optimization method of industrial rectifier transformer loss considering winding impedance matching. *IEEE Transactions on Industry Applications* 61, 3663–3673. doi:10.1109/TIA.2025.3538821.
- [14] Grau, F., Hernández, O., Montenegro, M., Nuñez, J., Quintero, O., 2024. Simulation of losses in a three-phase bank of transformers in the presence of harmonic distortion. *International Journal of Electrical and Computer Engineering* 14, 4827–4837. doi:10.11591/ijece.v14i5.pp4827-4837.
- [15] Gu, K., Song, H., Zheng, X., 2022. Simulation test of transformer short-circuit impedance based on equivalent model at different frequencies. *Journal of Vibroengineering* 24, 1174–1187. doi:10.21595/jve.2022.22686.
- [16] Hsu, C.H., 2022. Experimental results of electromechanical structure properties of noise and vibration on power transformers after lightning impulse test. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems* 134, 1–10. doi:10.1016/j.ijepes.2021.107458.
- [17] Mangalapuri, S., Polamraju, S., 2024. Performance evaluation of solar pv integrated with custom power device under various load conditions. *e-Prime - Advances in Electrical* 10, 1–12. doi:10.1016/j.prime.2024.100843.
- [18] Mao, S., Wu, X., Zhang, Y., 2025. Learning the physics-consistent material behavior from measurable data via PDE-constrained optimization. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering* 437, 1–19. doi:10.1016/j.cma.2025.117748.
- [19] Mishra, M., Ranjan, R., 2020. Advanced signal processing and machine learning techniques for voltage sag causes detection in an electric power system. *International Transactions on Electrical Energy Systems* 30. doi:10.1002/2050-7038.12167.
- [20] Morteza, M., Jawad, F., Behrooz, R., 2020. Thermal analysis and derating of a power transformer with harmonic loads. *IET Generation, Transmission & Distribution* 14, 1123–1134. doi:10.1049/iet-gtd.2019.070.
- [21] Nixon, S., Ruiu, P., Cadoni, M., Lagorio, A., Tistarelli, M., 2025. Assessing bias and computational efficiency in vision transformers using early exits. *EURASIP Journal on Image and Video Processing* 2, 1–20. doi:10.1186/s13640-024-00658-9.
- [22] Wu, H., Zhao, Y., Zizhuo, L., Zhang, C., Zhao, F., 2022. Phase compensation method of differential protection for distribution transformer based on wavelet transform. *Power System Protection and Control* 50, 76–83. doi:10.19783/j.cnki.pspc.211604.
- [23] Yang, K., Zhang, X., 2025. Transformer fault diagnosis method based on MTF and ghostnet. *Measurement* 249, 1–12. doi:10.1016/j.measurement.2025.117056.
- [24] Yanzheng, L., Chenhao, S., Xin, Y., Zhiwei, J., Jianhong, S., Zhijie, G., 2024. A transformer heavy overload spatiotemporal distribution prediction ensemble under imbalanced and nonlinear data scenarios. *Sustainability* 16, 1–20. doi:10.3390/su16083110.